

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА БЕЗУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ

NEW TECHNOLOGY OF CARBON-FREE HEAT EXCHANGE TUBES STEEL NUCLEAR REACTORS

Коршунов Е.А., Буркин С.П., В.С.Третьяков
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, spb@mtf.ustu.ru

The possibility of smelting iron with very low carbon content. As a raw material in the new technology can be considered metallurgical scale waste and waste of both ferrous and non-ferrous metallurgy. The design of a melting furnace in which the replacement fuse. Reduction of iron held metal reducing agents. A general scheme of a new technology for the production of pipes of nuclear power. The technology provides for the formation of hollow billets by freezing, pressing and rolling reduction using heat melting processing.

Keywords words: reducing melting, carbon-free iron, stainless steel, smelting unit, producing hollow billets, extrusion, rolling.

В традиционной технологии изготовления труб из коррозионностойких сталей, в частности для атомной энергетики, практически все переделы включают факторы, снижающие качество металлопродукции и неоправданно удорожающие производство.

В современной качественной металлургии актуальной проблемой является получение железа из лома без примесей и удаление углерода из железа до содержания 0,03...0,01%, которое производится по схеме доменная печь – кислородный конвертер

Схема доменная печь – кислородный конвертер содержит следующие серьезные внутренние противоречия:

- в ходе доменной плавки происходит не только восстановление железа из его оксидов, но и его «перевосстановление» – насыщение углеродом железа. Это вынуждает организовывать вторую стадию – удаления избытка углерода и некоторых других элементов путем окисления;
- глубокое обогащение железной руды требует измельчения руды до 0,05 мм. Такие частицы руды способны нагреваться и восстанавливаться за сотые и тысячные доли секунды, но по условиям газодинамики доменного процесса, частицы должны окисковываться и превращаться в агломерат или окатыши. При этом реакционная поверхность рудного материала уменьшается в тысячи раз и процессы прогрева и восстановления растягиваются на несколько часов;
- доменный процесс невозможен без использования кокса, а он загрязняет чугун, ухудшает экологию вблизи металлургического производства;
- при продувке чугуна кислородом в конвертерах в атмосферу выделяется большое количество мелких частиц оксида железа, что также портит экологию.

Указанные противоречия заставили ученых и практиков-металлургов разрабатывать новые методы получения железа, которые не имели бы коксодоменного производства.

В мире предложено до ста разных бездоменных методов, в которых осуществляют твердофазное или жидкофазное восстановление оксидов железа, причем при твердофазном

восстановлении железа насыщается углеродом до 2%, а при жидкофазном – до 4...5 %.

Разработанные бездоменные методы получения железа (стали) снимают часть отмеченных противоречий, но не полностью, и добавляют следующие свои проблемы:

- трудность очистки переплавляемого лома от нежелательных примесей;
- перед разливкой стали на машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), если требуется высокое ее качество и низкое содержание в стали углерода, практически обязательна внепечная обработка стали на специализированном оборудовании;
- если в дуговой электропечи (ЭДП) переплавляют ожеженные окатыши или горячепрессованные ожеженные брикеты, то на их производство также необходимо задалживать соответствующее оборудование;
- в процессе электроплавки также выделяется большое количество газов и требуются большие расходы на газоочистку;
- в продукте бездоменной плавки, как и в чугуне, углерода больше, чем его требуется для разных марок сталей и от лишнего углерода надо избавляться.

Получение качественной полой центробежно-литой заготовки возможно лишь на литейных машинах с герметизируемым рабочим пространством, поскольку литье открытой струей и послойное намораживание слитка в изложнице без специальной газовой защиты способствуют поражению заготовки глубоко залегающими окислами и нитридами.

Последующая интенсивная с чрезмерно большими вытяжками пластическая обработка, например. Методом холодной прокатки труб (ХПТ) не только порождает продольную острую текстуру, не устранимую термообработкой и повышающую склонность к растрескиванию и к МКК, но и усложняет технологию многочисленными промежуточными отжигами. Все промежуточные термические обработки требуют тщательного обезжиривания внутренней поверхности труб, применения высококачественных защитных атмосфер и значительных энерго- и трудозатрат. Если не удастся применить эффективную газовую защиту труб при нагреве, то

дополнительно появляется химическая обработка, которая затруднена на внутренней поверхности особенно длинномерных труб.

Новый метод плавки с вращением и восстановлением в жидкой фазе

С целью освоения производства труб из нестабилизированных аустенитных и ферритных сталей для атомной энергетики, характеризующихся повышенными требованиями к эксплуатационным свойствам и низкой себестоимостью производства, целесообразно освоить принципиально новую технологию изготовления труб, лишенную всех указанных недостатков традиционной технологии. Эту технологию можно считать прорывной, позволяющей завоевывать лидирующие и даже монопольные позиции на рынке труб для ТВЭЛов и теплообменников ядерных реакторов.

Вращение металла и шлака электромагнитным полем с образованием лунки параболической формы было осуществлено в СССР на Енакиевском заводе.

В Японии на фирме Kawasaki сначала на опытной, а затем и на промышленной установке опробовали агрегат, присоединенный к промежуточному ковшу МНЛЗ, в котором электромагнитным полем создают вращение жидкой стали с образованием лунки параболической формы. В эту лунку вытесняется

легкое неметаллическое включение, образованное в результате раскисления стали. Очищенная сталь поступает в промежуточный ковш и далее по металлопроводу в кристаллизатор МНЛЗ, при этом не происходит оседания на металлопроводе оксида алюминия, если раскисление стали осуществлялось алюминием.

Для производства безуглеродистого металла в России был разработан новый метод плавки с вращением и жидкофазным восстановлением (ПВЖФВ) и новый многофункциональный плавильный агрегат (МПА). Метод ПВЖФВ, реализуемый на МПА, позволяет осуществить многие бездоменные металлургические технологии, которые запатентованы. Эти технологии рекомендованы для восстановления оксидов металлов сильными металлическими восстановителями, такими как алюминий, кремний, титан и т.д. вместо углеродсодержащих восстановителей и водорода.

Восстановление оксидов железа металлическими восстановителями позволяет избежать проблем, свойственных коксодоменному процессу, а также проблем, свойственных известным внедоменным процессам.

На начальной стадии производства метод ПВЖФВ и МПА рекомендуются для микрометаллургического завода (микро МЗ) с производительностью 50...100 тыс. т специальной продукции в год, производство должно базироваться на новой структуре.

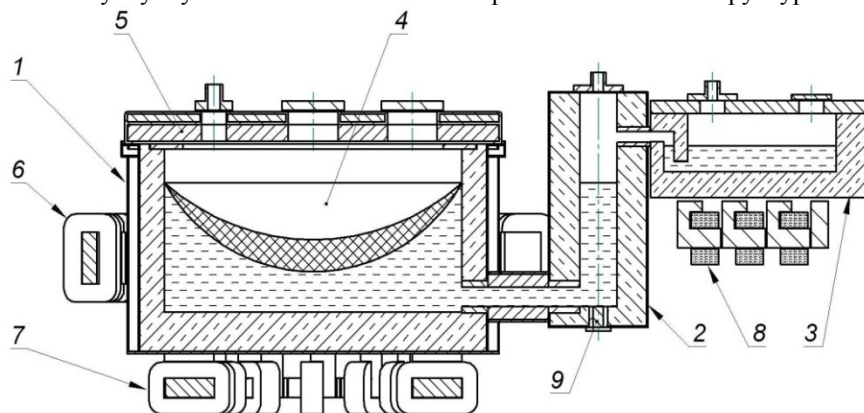


Рис. 1. Многофункциональный плавильный агрегат: 1 – плавильный агрегат, 2 – вспомогательный резервуар, 3 – накопитель жидкого металла, 4 – плавильная камера, 5 – крышка плавильной камеры, 6, 7, 8 – МГД-генераторы, 9 – выпускное отверстие.

Агрегат (МПА) включает следующие основные узлы: водоохлаждаемые трубными элементами стенки футерованной плавильной камеры, вспомогательный резервуар, накопитель жидкого металла, плавильную камеру, крышку плавильной камеры с отверстием для загрузки шихты, магнитно-гидродинамические устройства (МГД), обеспечивающие вращение и нагрев (плавление) металла.

МПА представляет собой новый индукционный агрегат для нагрева и плавления. На донной части тигля установлена главная индукционная секция для нагрева и плавления с электромагнитным вращателем, работающем с

частотой 1,5...4 Гц и обеспечивающей вращение расплава в тигле с образованием мениска параболической формы. Процесс обеспечивает продолжительную службу плавильного тигля, вследствие того, что при вращении расплава металл покрывает футеровку тигля и защищает огнеупорную кладку от агрессивного действия шлака. Шлак удаляется из тигля плавильного агрегата эжекционным насосом, а расплав стали сифонным способом передается в рабочую емкость литейной машины.

В качестве исходных сырьевых материалов используются:

- металлургическая окалина собственного производства;
- феррохром;
- ферроалюминий;
- ферроникель;
- известь для корректировки шлака.

Главные преимущества и особенности разработок:

- возможность получения большой прибыли при маломасштабном производстве конкурентной продукции на микро МЗ;
- сравнительно низкие начальные сторонние затраты (порядка 20...30%) на сооружение микро-МП, быстро окупаемые (до одного года) и далее производимые за счет собственной прибыли;
- в большинстве разработанных технологий переработки разной шихты, содержащей оксиды металлов, металл из оксидов восстанавливается на углерод-содержащими восстановителями (C, CO, H₂), а металлическими (Al, Si, Ti, Mg, Fe, Zn), что позволяет сделать процесс переработки шихты на металлическую и на не металлическую продукцию энергосберегающим, экологически чистым и безотходным, причем во всех технологиях применяется метод ПВЖФВ, и если шихта содержит окисленное железо, то выплавляться оно будет не содержащим углерода;
- возможна плавка шихты, содержащей до 100% оксидов металлов;
- все реакции в процессе плавки известны и хорошо изучены, новые разработанные технологии реализуются с учетом опубликованных данных по этим реакциям, но в новых условиях, которые обеспечиваются на новом плавильном оборудовании (МПА).

Одна из технологий включает безуглеродистое восстановление железа из оксидов в жидкой фазе и малотоннажную плавку безуглеродистого высококачественного металла, который может быть использован для производства труб, используемых для ТВЭЛов при высоком уровне нейтронной радиации.

В начале, расплав ферроалюминия заливается в прогретый тигель, расплав приводится во вращение и окалина вводится в лунку параболической формы. В этом случае железо восстанавливается алюминием с протеканием экзотермической реакции. Как результата, без ввода дополнительной мощности, благодаря высокой эффективности этого процесса обеспечивается высокий процент извлечения железа (до 99,8%), железная окалина используется для получения безуглеродистого железа, которое легируется чистым хромом, ферроникелем и ферроалюминием. Легирующие элементы легко усваиваются благодаря интенсивному перемешиванию расплава и большой площади поверхности между металлом и шлаком. Использование извести для шлака, как это типично для традиционного жидкофазного восстановления в расплаве, обеспечивает получение безотходной продукции благодаря стехиометрическому соотношению в шлаке, соответствующему

высокоглиноземистому цементному клинкеру. В этом случае задаются соотношения компонентов CaO и Al₂O₃ в шлаке. Отсутствие оксидов железа обеспечивает высокое качество высокоглиноземистого цемента.

Были составлены материальные и тепловые балансы и проведен энергетический анализ для технологии получения безуглеродистого железа. При этом расход энергии получен 583 кВт·ч на тонну загружаемых материалов в агрегат, а энергоемкость составила 4208 МДж на продукции.

Технология разливки и дальнейшей обработки

В литейной машине формирование полой прессовой заготовки осуществляется методом намораживания расплава нержавеющей стали на трубчатый водоохлаждаемый кристаллизатор, изготовленный из той же марки нержавеющей стали и в дальнейшем являющийся частью слитка. Намораживание металла на кристаллизатор проводится при циклическом движении расплава вдоль фронта кристаллизации, обеспечиваемом регулированием частоты тока питания электромагнитного вращателя. При разливке температура расплава стабилизируется за счет перемешивания и автоматического управления индуктором плавильной емкости печи. После формирования слитка заданного диаметра он извлекается вверх из литейной машины с калибровкой наружной поверхности протяжкой через графитовое кольцо. Слиток или несколько одновременно формируемых слитков каруселью передается на участок механической обработки, где после пильной отрезки концевых частей слиток устанавливается с зацентровкой по трубе-кристаллизатору на токарном станке и протачивается по наружному диаметру. При таком способе механообработки гарантируется строгая коаксиальность полого слитка.

Слитки подвергаются нагреву или подогреву в проходной индукционной печи и с заданным темпом подаются в контейнер трубопрофильного пресса прямого прессования заготовок.

По оси пресса установлен непрерывный редуционно-растяжной стан с индивидуальным гидроприводом четырехвалковых клетей. Скоростной режим работы стана согласуется с работой пресса, а тепло прессового передела эффективно используется при горячей редуционной прокатке. Межклетевые натяжения заданного уровня обеспечиваются достаточно дешевыми аппаратными средствами гидроуправления. Согласование скоростей индивидуально приводимых валков каждой клетки обеспечивается не механическими системами, которым свойственны люфты и создание асимметрии очага деформации при прокатке, а серийно производимыми делителями и сумматорами потоков. Редуционно-растяжная прокатка позволяет в широком диапазоне варьировать диаметр и толщину стенки трубы и,

следовательно, готовить трубную заготовку сразу под финишную обработку, даже минуя ХПТ.

Трубопрофильный пресс за счет управления положением оправки (иглы) позволяет прессовать трубную заготовку с конусными пробками, которые после ускоренного охлаждения катаной трубы удаляются вместе с утолщенными концами трубы. Охлаждение труб из аустенитных сталей рассматривается в данном случае как операция закалки, а требуемая температура трубы на выходе из стана обеспечивается как исходным нагревом в индукционной печи прессовых заготовок, так и управлением скоростью прессования. При прессовании труб из полрой заготовки с качественной внутренней поверхностью при отсутствии исходной разностенности гарантируется отсутствие надрывов внутренней поверхности трубы, характерных для процесса прессовой прошивки сплошных заготовок, и получение как прессованных, так и горячекатанных из трубных заготовок практически без разностенности.

Итоговая диаграмма последовательного протекания процесса изготовления труб из устойчивой аустенитной и ферритной стали представлена на рис 2.

Данная технология безотходна и позволяет получать в качестве товарной продукции:

- трубы для ТВЭЛов и теплообменников ядерных реакторов из коррозионностойких нестабилизированных сталей аустенитного и ферритного класса;
- клинкер глиноземистого цемента.

Технология реализуется в комплексе нестандартного и несерийного оборудования:

- многофункционального плавильного агрегата с системой гидродинамического вращения расплава и камерой для формирования полого слитка методом намораживания на трубчатый водоохлаждаемый расходуемый кристаллизатор;
- горизонтального высокоскоростного пресса с независимой двухпозиционной прошивной системой;
- редуционно-растяжного стана с четырехвалковыми гидроприводными клетями;
- вспомогательного оборудования (устройств подачи, оборудования горячей механической обработки слитков, индукционной проходной печи, линии закалки труб, пил обрезки пробок, приемных карманов).

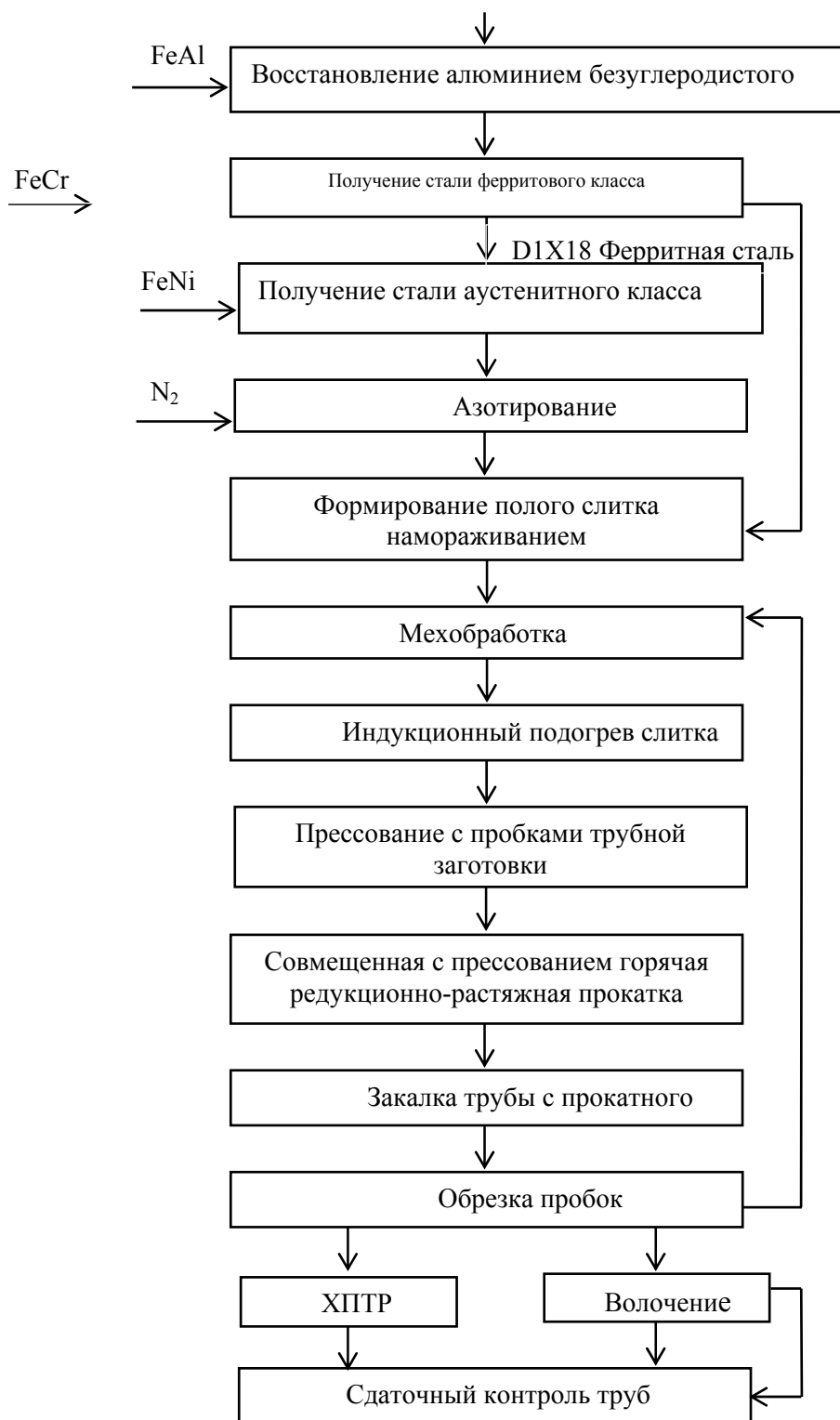


Рис. 2. Последовательная диаграмма процесса

Главные достоинства новой технологии:

- эффективная утилизация железной окалины;
- выплавка нержавеющей аустенитной стали с низким содержанием углерода;
- экзотермическая реакция при восстановлении железа при применении металлических восстановителей;
- безотходный процесс выплавки железа с получением дополнительных товарных продуктов,

таких как высокоглиноземистый цементный клинкер;

- высокая стойкость футеровки тигля вследствие защиты металлом футеровки от агрессивности шлака;
- стабилизация температурного режима при плавлении, интенсивное перемешивание, большая площадь поверхности контакта шлака с металлом, быстрое и равномерное растворение легирующих

компонентов и ферросплавов вследствие вращения металла;

- минимум эмиссии газов вследствие восстановления железа алюминием;
- энергосбережение за счет экзотермических реакций при восстановлении и за счет совмещения плавки, литья и горячей деформации.
- снижение трудозатрат и возможный высокий уровень автоматизации;
- безотходность технологии наиболее эффективной утилизации металлургической окалины.
- возможность отливки биметаллических трубных заготовок;
- получение коаксиальных полых прессовых заготовок;
- мягкая схема напряженного состояния при прессовании, гарантирующая возможность прессования малопластичных сплавов; отсутствие надрывов внутренней поверхности трудной заготовки и исключение разностенности горячепрессованной трубы;
- использование тепла прессового передела при редуccionной горячей прокатке;
- возможность прессования и прокатки трубной заготовки с концевыми пробками, полностью исключая окисление и газонасыщение внутренней поверхности трубы на горячем переделе;
- создание натяжения редуccionным станом трубы, выходящей из прессовой матрицы, за счет чего снижение силы прессования и исключение задиrow поверхности трубы в калибрующей части матрицы;
- максимальное снижение степени холодной пластической деформации в цикле изготовления труб (при интенсивной холодной деформации последующие отжиги не в состоянии устранить текстуру деформации, т.к. она наследуется текстурой рекристаллизации; в итоге в готовых трубах прочность минимальна в тангенциальном направлении, что противоречит основному назначению большинства труб);
- исключение операции прессовой или косовалковой прошивки и сверления трубных заготовок.

Принципиально новая технология и разработка оригинальных конструкций оборудования, часть элементов которого являются мехатронными системами, без сомнения, сопряжены с определенным производственным риском, оправданность которого обусловлена перспективами создания высококачественной продукции и кардинальным изменением структуры металлургического производства, гарантирующим максимальное энерго- и ресурсосбережение и создание сплавов с особыми физическими и механическими свойствами. Следует отметить, что даже приблизительные технико-экономические расчеты на объем производства труб из нестабилизированной нержавеющей стали до 40

тыс. т в год, показывают беспрецедентно малый срок окупаемости капитальных вложений, не превышающий 0,5 года, несмотря на сравнительно трудоемкую и дорогостоящую пусконаладку принципиально нового оборудования и оптимизацию технологических параметров.

Как известно, этот безуглеродистый металл, легированный Cr, Ni и N₂ обеспечивает возможность получения упрочняющей нанокристаллической структуры и как результат получение высокопрочного коррозионностойкого металла. При его использовании срок службы ТВЭЛов и теплообменников в атомных реакторах может быть увеличен в 2-3 раза.

Заключение

1. Разработана новая технология производства безуглеродистого нержавеющей металла с упрочняющей нанокристаллической структурой.

2. При реализации этой технологии используется многофункциональный плавильный агрегат с вращением металла и шлака.

3. Нержавеющий аустенитный металл может быть использован для ТВЭЛов и теплообменников атомных реакторов с увеличением стойкости ТВЭЛов и труб.

Библиографический список

1. Патент РФ № 2176060. Агрегат для выплавки металла из оксидсодержащих руд /Коршунов Е.А., Смирнов Л.А., Лисиенко В.Г. и др. БИ № 32, 2001.
2. Патент РФ № 2350670. Способ переработки концентратов из руд, содержащих оксиды железа, титана и ванадия и устройство для его осуществления. /Коршунов Е.А., Арагилан О.А., Ардашев М.Г. и др. опубликован 27.03.2009.
3. Коршунов Е.А., Гайнанов Д.Н., Сарапулов Ф.Н. и др. Многофункциональный плавильный агрегат для реализации новых технологий в условиях миниметаллургических предприятий и цехов крупных машиностроительных заводов / Литейщик России, 2004. № 10. С. 21-25.
4. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладигичев М.Г. Плавильные агрегаты: теплотехника, управление и экология. Справочное издание в 4-х томах. Кн.2 /Под ред. В.Г. Лисиенко. М.: Теплотехник, 2005.
5. Буркин С.П., Коршунов Е.А., Шимов В.В. и др. Ресурсо- и энергосбережение в металлургии. Разработка машин и технологий при инновационном риске. Учебник в двух книгах. Кн.1. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 498 с.